ROMANIA
RENEL
REGIA AUTONOMA DE ELECTRICITATE

CENTRUL DE FORMARE
PROFESIONALA

V. Tudora

FUNCTIONAREA IN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR

Ept 1-7

1997

1. CONDITII PENTRU FUNCTIONAREA IN PARALEL

Pentru ca transformatoarele să poată funcţiona în paralel trebuie îndeplinite următoarele condiţii:

a) tensiunile nominale primare şi secundare să fie aceleaşi cu abateri în limitele ±0,5% ale raportului de transformare la mersul în gol;

b) tensiunile de scurtcircuit să fie aceleaşi, cu abateri tolerate ±10% pentru toate transformatoarele;

c) să aibă aceeaşi grupă de conexiune sau grupe de conexiuni admise să funcţioneze în paralel (respectiv să introducă acelaşi decalaj între tensiunile primare şi secundare omoloage);

d) să aibă raportul între puterea celui mai mare şi a celui mai mic transformator cu valoarea maximă 2;

– în instalaţiile existente, în cazul transformatoarelor fabricate înainte de 1972, raportul puterilor poate avea valori maxim 3.

La transformatoarele cu trei înfăşurări, funcţionarea în paralel este posibilă, atunci când condiţiile de funcţionare în paralel sunt îndeplinite pentru fiecare din perechile de înfăşurări care funcţionează în paralel.

Transformatoarele din grupa de conexiuni 11 pot funcţiona în paralel cu transfomatoarele care aparţin grupei de conexiuni 5, dacă sunt satisfăcute celelalte condiţii de funcţionare în paralel şi dacă legarea bornelor celor două transformatoare este realizată după una din variantele din tabelul 1. In fig.1 este arătat spre exemplificare modul de conectare a transformatorilor cu conexiunea Dy–5 cu Dy-11, şi Dy-5 cu Dy-1.

Tabel 1

Varianta	Grupa de conexiuni	înaltă	joase
I	Dy5; Yd5; Yz5; Dy11;Yd11;Yz11.	A,B,C A,C,B	a,b,c c,b,a
II	Dy5; Yd5; Yz5; Dy11; Yd11;Yz11	A,B,C C,B,A	a,b,c b,a,c
III	Dy5; Yd5; Yz5; Dy11; Yd11; Yz11	A,B,C B,A,C	a,b,c a,c,b

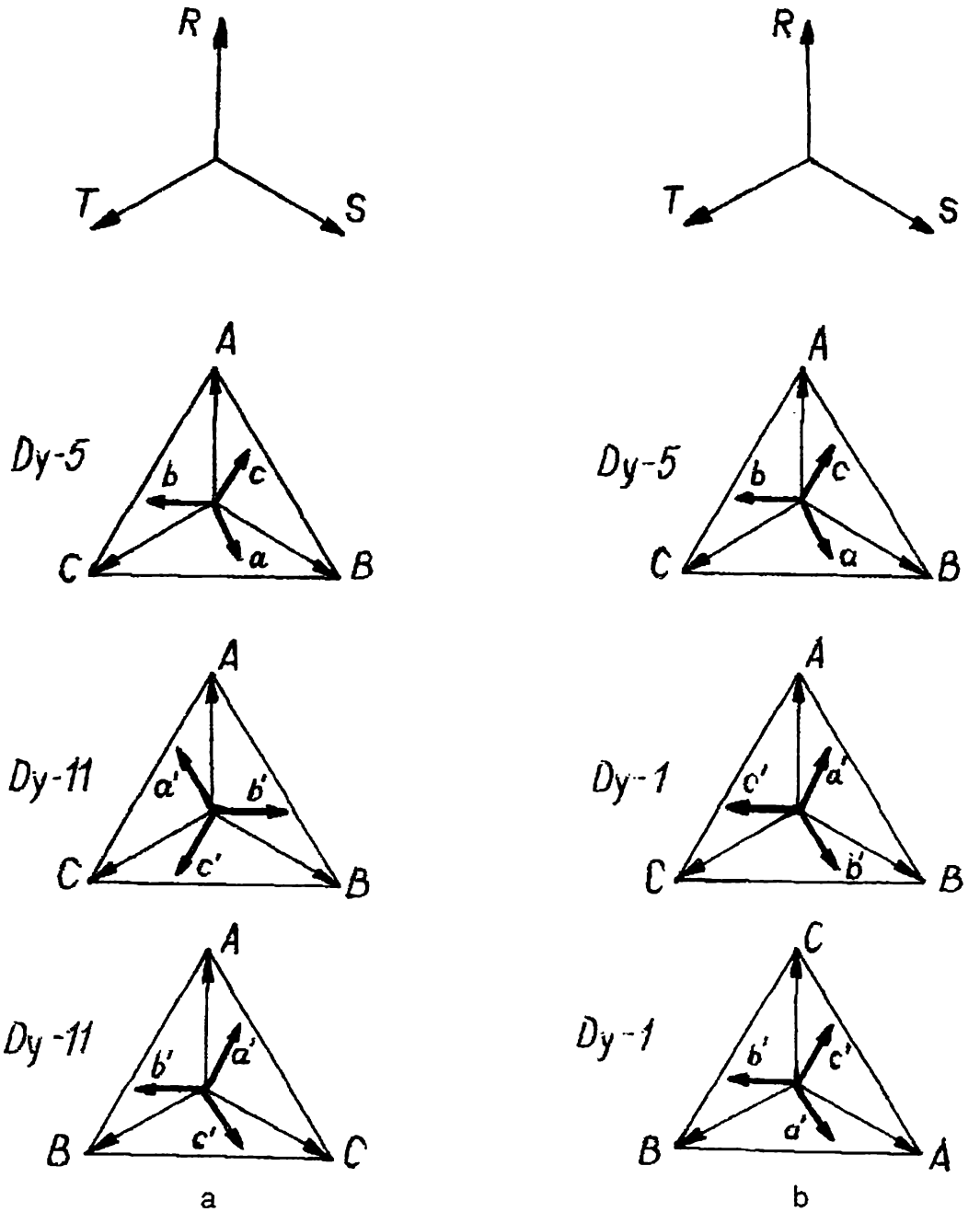


Figura 1

Funcţionarea în paralel a transf. Dy-5 cu transf. Dy-11 este posibilă dacă se fac următoarele legături:

	transf. Dy-5	transf. Dy-11
în primar:	A-R	A-R
	B-S	B-T
	C-T	C-S
în secundar:	a-R	a'-c (T)
	b-S	b'-b (S)
	c-T	c'-a (R)

Funcţionarea în paralel a transf. Dy-5 cu transf. Dy-1 este posibilă dacă se fac următoarele legături în:

secundar:	a'-c
	b'-a
	c'-b
sau în primar:	C-R
	A-S
	B-T

2. Efectul inegalităţii rapoartelor tensiunilor la borne, la mersul în gol

Pentru aceasta se consideră cazul a trei transformatoare cuplate în paralel pe tensiunea primară, având puteri egale, tensiuni de scurtcircuit egale, dar tensiunile secundare, la mersul în gol diferite.

Din cauza diferenţelor între tensiunile secundare, la cuplarea în paralel ale celor 3 transformatoare, se produc curenţi de circulaţie (de egalizare)

Se pune problema determinării acestor curenţi şi limitele în care pot fi admise diferenţele dintre tensiunile secundare având:

rapoartele de înfăşurare ale transformatoarelor,

$$K_{wI} = \frac{W_{2I}}{W_{1I}};\quad K_{wII} = \frac{W_{2II}}{W_{1II}};\quad K_{wIII} = \frac{W_{2III}}{W_{1III}}$$

– impedantele globale le transformatoarelor Z_I, Z_{II} şi Z_{III}.

Ecuaţiile tensiunilor raportate la secundar sunt:

$$\begin{cases} K_{wI}\,\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_I\,\underline{I}_I \\ K_{wII}\,\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_{II}\,\underline{I}_{II} \\ K_{wIII}\,\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_{III}\,\underline{I}_{III} \end{cases}$$

Luând ca referinţă transformatorul cu raportul de transformare cel mai mic de exemplu transformatorul I; adunând şi scăzând termenul $K_{wI}\,\underline{U}_1$, în ecuaţiile de mai sus se obţine:

$$K_{wII}\,\underline{U}_1 = (K_{wII} - K_{wI})\,\underline{U}_1 + K_{wI}\,\underline{U}_1 = \underline{V}_{II} + K_{wI}\,\underline{U}_1$$

$$K_{wIII}\,\underline{U}_1 = (K_{wIII} - K_{wI})\,\underline{U}_1 + K_{wI}\,\underline{U}_1 = \underline{V}_{III} + K_{wI}\,\underline{U}_1$$

unde: $\underline{V}_{II} = (K_{wII} - K_{wI})\,\underline{U}_1$

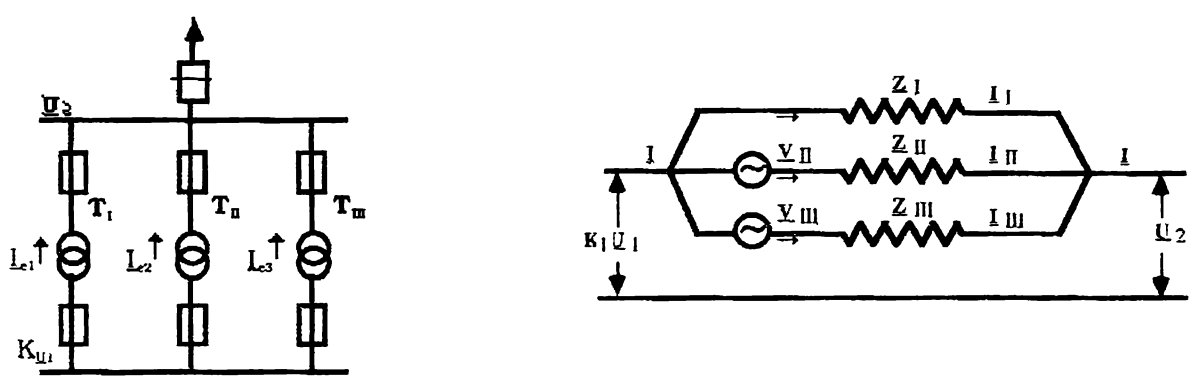
$\underline{V}_{III} = (K_{wIII} - K_{wI})\,\underline{U}_1$

Tensiunile $\underline{V}_{II}$, $\underline{V}_{III}$ sunt sinfazice între ele şi în fază cu U1.

Cu aceste notaţii ecuaţiile tensiunilor devin:

$$\begin{cases} K_{wI}\,\underline{U}_1 = \underline{U}_2 + \underline{Z}_I\,\underline{I}_I \\ K_{wII}\,\underline{U}_1 + \underline{V}_{II} = \underline{U}_2 + \underline{Z}_{II}\,\underline{I}_{II} \\ K_{wIII}\,\underline{U}_1 + \underline{V}_{III} = \underline{U}_2 + \underline{Z}_{III}\,\underline{I}_{III} \end{cases}$$

Schema echivalentă a celor trei transformatoare (I,II,III) având ecuaţiile de funcţionare de mai sus este reprezentată în fig.2b.



a b

Figura 2

Circuitul secundar fiind deschis, avem 3 circuite închise în paralel pe impedantele Z_I, Z_{II}, Z_{III}, alimentate fiecare de o sursă de tensiune alternativă:

$$\underline{V}_I = 0; \quad \underline{V}_{II} \neq \underline{V}_{III} \neq 0$$

In aceste circuite închise, în paralel, vor apare curenţi de egalizare pe care–i notăm cu:

$$\underline{I}_{eI}, \underline{I}_{eII}, \underline{I}_{eIII}.$$

Aceşti curenţi de egalizare, numiţi astfel fiindcă egalizează la o valoare unică tensiunea U_2 la bornele secundare, sunt curenţi de circulaţie interioară în cele două înfăşurări ale transformatoarelor cuplate în paralel.

Se ia ca sens pozitiv pentru curenţi şi tensiuni sensul săgeţilor (vezi fig.2)

Aplicând legea lui Kirchhoff la nodul unde se întâlnesc curnţii, se obţine:

$$\underline{I}_{eI} + \underline{I}_{eII} + \underline{I}_{eIII} = 0$$

Luând în consideraţie şi cele trei ecuaţii ale tensiunilor avem patru ecuaţii cu patru necunoscute: $\underline{I}_{eI}$, $\underline{I}_{eII}$, $\underline{I}_{eIII}$, $\underline{U}_2$

Rezolvând sistemul se obţine:

$$\underline{U}_2 = K_{WI}\underline{U}_1 + \frac{\underline{Z}_I\underline{Z}_{III}\underline{V}_{II} + \underline{Z}_I\underline{Z}_{II}\underline{V}_{III}}{\underline{Z}_I\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{II}\underline{Z}_{III} + \underline{Z}_{III}\underline{Z}_I}; \quad I_{eI} = \frac{-\underline{V}_{II}\underline{Z}_{III} - \underline{V}_{III}\underline{Z}_{II}}{\underline{Z}_I\underline{Z}_{II} + \underline{Z}_{II}\underline{Z}_{III} + \underline{Z}_{III}\underline{Z}_I}$$

expresiile pentru $\underline{I}_{eII}$ şi $\underline{I}_{eIII}$, se obţin prin permutări circulare.

Formulele deduse pentru U_2 şi I_{eI} se mai pot scrie şi sub forma:

$$\underline{U}_2 = K_{WI}\underline{U}_1 + \frac{\frac{\underline{V}_{II}}{\underline{Z}_{II}} + \frac{\underline{V}_{III}}{\underline{Z}_{III}}}{\frac{1}{\underline{Z}_I} + \frac{1}{\underline{Z}_{II}} + \frac{1}{\underline{Z}_{III}}}; \quad \underline{I}_{eI} = \frac{1}{\underline{Z}_I} \quad \frac{-\frac{\underline{V}_{II}}{\underline{Z}_{II}} - \frac{\underline{V}_{III}}{\underline{Z}_{III}}}{\frac{1}{\underline{Z}_I} + \frac{1}{\underline{Z}_{II}} + \frac{1}{\underline{Z}_{III}}}$$

In sistemul de ecuaţii din care au rezultat expresiile de mai sus (pentru $\underline{U}_2$ şi $\underline{I}_{eI}$) s–a considerat că $\underline{V}_I = 0$

In cazul în care $\underline{V}_I \neq 0$, prin rezolvarea sistemului respectiv se obţine:

$$\underline{U}_2 = K_{WI}\underline{U}_1 + \frac{\frac{\underline{V}_I}{\underline{Z}_I} + \frac{\underline{V}_{II}}{\underline{Z}_{II}} + \frac{\underline{V}_{III}}{\underline{Z}_{III}}}{\frac{1}{\underline{Z}_I} + \frac{1}{\underline{Z}_{II}} + \frac{1}{\underline{Z}_{III}}} = K_{WI}\underline{U}_1 + \frac{\sum_{j=I}^{III}\frac{\underline{V}_j}{\underline{Z}_j}}{\sum_{j=I}^{III}\frac{1}{\underline{Z}_j}}$$

$$\underline{I}_{eI} = \frac{1}{\underline{Z}_I}\left[\underline{V}_1 - \frac{\frac{\underline{V}_I}{\underline{Z}_I} + \frac{\underline{V}_{II}}{\underline{Z}_{II}} + \frac{\underline{V}_{III}}{\underline{Z}_{III}}}{\frac{1}{\underline{Z}_I} + \frac{1}{\underline{Z}_{II}} + \frac{1}{\underline{Z}_{III}}}\right] = \frac{1}{\underline{Z}_I}\left[\underline{V}_1 - \frac{\sum_{j=I}^{III}\frac{\underline{V}_j}{\underline{Z}_j}}{\sum_{j=I}^{III}\frac{1}{\underline{Z}_j}}\right]$$

Când transformatoarele se cuplează în sarcină adică încep să trimită în reţeaua secundară curentul total I, curentul care circulă prin fiecare transformator va fi suma a doi curenţi: un curent de sarcină şi un curent de egalizare; pentru transformatorul 1, de exemplu, $\underline{I}_I = \underline{I}_{2I} + \underline{I}_{eI}$ (I_{2I} este curentul de sarcină secundar al transf. 1)

In mod analog se rezolvă problema pentru n transformatoare care funcţionează în paralel (fig. 3): In acest caz, prin rezolvarea sistemului de ecuaţii (n+1 ecuaţii cu n+1 necunoscute), considerând $V_I \neq 0$ rezultă:

$$\underline{U}_2 = K_{wI}\,\underline{U}_1 + \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{\underline{V}_j}{\underline{Z}_j}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\underline{Z}_j}} \; ; \qquad \underline{I}_{eI} = \frac{1}{\underline{Z}_j}\left[\underline{V}_J - \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{\underline{V}_j}{\underline{Z}_j}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\underline{Z}_j}}\right]$$

Din cele prezentate mai sus rezultă următoarele concluzii:

a) Transformatoarele care funcţionează în paralel trebuie să aibă acelaşi raport de transformare al tensiunilor la borne, la mersul în gol.

Impedanţele transformatoarelor fiind relativ mici chiar cele mai mici diferenţe între aceste rapoarte ale tensiunilor de mers în gol, deci, chiar cele mai mici valori ale tensiunilor notate cu $\underline{V}_I$; $\underline{V}_{II}$ . . . $\underline{V}_n$, produc curenţi de circulaţie foarte mari, care fac imposibilă funcţionarea în paralel a transformatoarelor.

Se admite o diferenţă de cel mult ± 0,5% între rapoartele tensiunilor la borne, la mersul în gol, ale transformatoarelor care merg în paralel.

Curenţii de egalizare pot circula într–un sens sau în celălalt.

Deci unele transformatoare vor funcţiona ca generatoare, iar celelalte vor funcţiona ca receptoare.

b) Supraîncărcarea transformatoarelor, ca urmare a inegalităţii rapoartelor de transformare, se produce în condiţiile în care curentul exterior în linie este acelaşi.

Inseamnă că funcţionarea cu acelaşi raport al tensiunilor la borne, la mersul în gol, cu care facem comparaţie trebuie să fie un raport mediu al tensiunilor de mers în gol, cuprins între rapoartele de transformare ale celor **n** transformatoare şi care să producă în circuitul exterior acelaşi curent pe care–l produc cele **n** transformatoare cu rapoarte inegale ale tensiunilor la borne.

c) Curenţii de egalizare care sunt independenţi de repartiţia curentului de linie între transformatoare, modifică această repartiţie, supraîncărcând unele transformatoare şi descărcând altele.

Aceşti curenţi pot atinge valori mari faţă de curenţii nominali ai transformatoarelor şi deci pot conduce la valori inadmisibile pentru aceste transformatoare.

Acesta este unul din motivele pentru care nu se admite funcţionarea în paralel a transformatoarelor cu puteri prea diferite (cu o diferenţă mai mare de 1 la 2 respectiv 3).

d) Efectul inegalităţii rapoartelor tensiunilor la borne, la mersul în gol, este micşorat când transformatoarele nu lucrează în acelaşi post (staţie) de transformare. In acest caz impedanţele care intervin în calculul curenţilor de egalizare sunt mărite cu impedanţa liniei exterioare de la postul de transformare până la punctul de cuplare din reţea şi ca urmare, rezultă curenţi de egalizare micşoraţi.

2.1. Aplicaţie

Intr–un post funcţionează în paralel pe tensiunea primară de 20 KV, trei transformatoare având fiecare o putere de 250 KVA, o tensiune de scurtcircuit de 5,5% şi grupa de conexiuni DYo–11. Tensiunile secundare de mers în gol ale celor trei transformatoare (înainte de a fi cuplate în paralel) sunt: 390V; 400V, 415V, tensiunea nominală de utilizare a reţelei fiind de 400V.

Să se determine curentul de egalizare maxim atunci când cele trei transformatoare sunt legate în paralel iar reţeaua secundară este în gol.

$U_I = 20.000$ V

$S = S_I = S_{II} = S_{III} = 250$ KVA $\qquad U_{2fI} = \frac{U_{2lI}}{\sqrt{3}} = \frac{390}{\sqrt{3}} = 225{,}4$ V

$U_K = U_{KI} = U_{KII} = U_{KIII} = 5{,}5\ \%$

$U_{2aI} = 390$ v

$U_{2aII} = 400$ v

$U_{2aIII} = 415$ v

$$U_{2fII} = \frac{U_{2aII}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231{,}2\ V$$

$$U_{2fIII} = \frac{U_{2aIII}}{\sqrt{3}} = \frac{415}{\sqrt{3}} = 239{,}9\ V$$

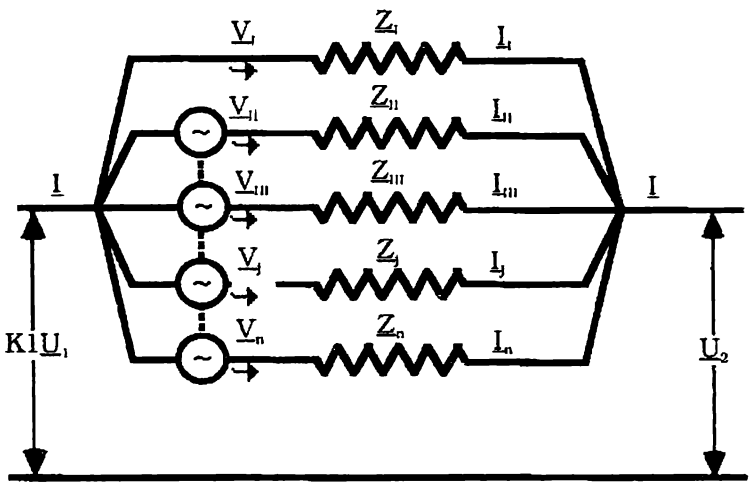


Figura 3

Curentul nominal în secundarul transformatorului al doilea, la tensiunea nominală, este:

$$I_{2II} = \frac{S_{II}}{\sqrt{3}\ U} = \frac{250 \times 10^3}{\sqrt{3}\ \ 400} = 361{,}3\ A$$

Impedanța de dispersie, egală pentru cele trei transformatoare, este:

$$Z = Z_I = Z_{II} = Z_{III} = \frac{U_K\ U_{2f\,II}}{I_{2II}} = \frac{0{,}055 \times 231{,}2}{361{,}3} = 0{,}035\ \Omega$$

Rapoartele de înfășurare pentru cele trei transformatoare sunt:

$$K_{WI} = \frac{W_{2I}}{W_{1I}} \approx \frac{U_{2fI}}{U_1} = \frac{225{,}4}{20.000} = 0{,}0112;$$

$$K_{WII} = \frac{W_{2II}}{W_{1II}} \approx \frac{U_{2fII}}{U_1} = \frac{231{,}2}{20.000} = 0{,}0115;$$

$$K_{WIII} = \frac{W_{2III}}{W_{1III}} \approx \frac{U_{2fIII}}{U_1} = \frac{239{,}9}{20.000} = 0{,}012;$$

Transformatorul care va avea curentul de egalizare maxim, va fi primul deoarece are raportul de înfășurare minim.

Deci:

$$V_I = 0;\ \ V_{II} = (K_{WII} - K_{WI})\ U_1 = (0{,}0115 - 0{,}0112)\ 20.000 = 6\ V$$

$$V_{III} = (K_{WIII} - K_{WI})\ U_1 = (0{,}012 - 0{,}0112)\ 20.000 = 10\ V$$

$$I_{eI} = \frac{-V_{II}Z - V_{III}Z}{3Z^2} = \frac{-V_{II} - V_{III}}{3Z} = -\frac{6 + 10}{3 \times 0{,}035} = -150A$$

Semnul (–) indică, că sensul real al curentului prin transformatorul I este invers sensului

considerat în mod convenţional în fig. 2a, b (transformatorul funcţionează ca receptor); curentul de egalizare reprezintă 42% faţă de curentul nominal.

$$I_{eII} = \frac{(V_{II} - V_{III}) + (V_{II} - V_{I})}{3Z} = \frac{(6-10)+(6-0)}{3 \times 0{,}035} = 19\ A$$

$$I_{eIII} = \frac{(V_{III} - V_{I}) + (V_{III} - V_{II})}{3Z} = \frac{(10-0)+(10-6)}{3 \times 0{,}035} = 133\ A$$

Transformatorul III, care are raportul de transformare cel mai mare, se va supraîncărca (faţă de curentul de sarcină) cu 133A adică 37% faţă de curentul nominal.

In aceste condiţii funcţionarea în paralel a celor trei transformatoare cu variaţie de –2,6% şi +43% a raportului de transformare faţă de cel nominal (0,0115) este imposibilă.

3. Influenţa tensiunilor de scurtcircuit asupra repartiţiei sarcinii pe transformatoarele care funcţionează în paralel.

Se consideră cazul a trei transformatoare cuplate în paralel având impedanţele globale Z_I, Z_{II}, Z_{III} şi curenţii secundari I_I, I_{II}, I_{III}.

Suma fazorială a curenţilor secundari ai celor trei transformatoare este egală cu curentul de linie I. Căderile fazoriale de tensiune trebuie să fie egale aşa cum rezultă din figura 4.

$$I_I Z_I = I_{II} Z_{II} = I_{III} Z_{III} = ct. = U_K$$

$$\text{sau} \quad I_I = \frac{U_K}{Z_I}; \quad I_{II} = \frac{U_K}{Z_{II}}; \quad I_{III} = \frac{U_K}{Z_{III}}$$

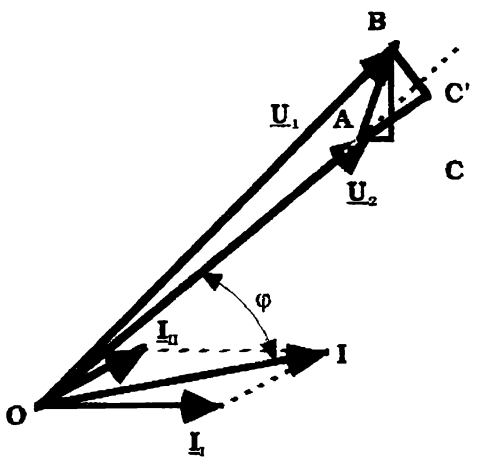


Figura 4

Pentru toţi transformatorii cuplaţi în paralel rezultă:

$$I_I + I_{II} + I_{III} = U_K \left(\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_{II}} + \frac{1}{Z_{III}}\right)$$

Considerând un transformator, de exemplu transformatorul I.

$I_I = \frac{U_K}{Z_I}$ raportându–l la suma curenţilor secundari ai celor trei transformatoare se obţine relaţia:

$$\frac{I_I}{I_I + I_{II} + I_{III}} = \frac{U_K \frac{1}{Z_I}}{U_K \left(\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_{II}} + \frac{1}{Z_{III}}\right)} = \frac{\frac{1}{Z_I}}{\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_{II}} + \frac{1}{Z_{III}}}$$

Dar ($I_I + I_{II} + I_{III}$) este suma aritmetică a curenţilor din cele trei transformatoare, nefiind egală cu curentul din linie I, care este suma fazorială a acestor curenţi.

Insă datorită faptului că defazajele curenţilor sunt foarte apropiate între ele se poate considera $I_I + I_{II} + I_{III} \approx I$ şi relaţia de mai sus devine:

$$\frac{I_I}{I} = \frac{\frac{1}{Z_I}}{\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_{II}} + \frac{1}{Z_{III}}}$$

Din această relaţie rezultă că la funcţionarea în paralel a mai multor transformatoare, repartizarea curentului de linie între aceste transformatoare se face invers proporţional cu impedanţele lor. Considerând curenţii nominali ai transformatoarelor care funcţionează în paralel, relaţiile de mai sus devin:

$$I_{IN} Z_I = I_{IIN} Z_{II} = \ldots\ldots = ct. = U_K,$$

U_k fiind tensiunea de scurtcircuit pentru sarcina nominală.

$$I_{IN} = \frac{U_K}{Z_I}\ ;\ I_{IIN} = \frac{U_K}{Z_{II}}\ ;\ I_{IIIN} = \frac{U_K}{Z_{III}}$$

De unde: $I_{IN} + I_{IIN} + I_{IIIN} = U_K \left(\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_{II}} + \frac{1}{Z_{III}}\right)$

Considerând transformatorul I;

$$\frac{I_{IN}}{I_{IN} + I_{IIN} + I_{IIIN}} = \frac{\frac{1}{Z_I}}{\frac{1}{Z_I} + \frac{1}{Z_{II}} + \frac{1}{Z_{III}}}\ ;$$

rezultă:

$$\frac{I_I}{I} = \frac{I_{IN}}{I_{IN} + I_{IIN} + I_{IIIN}}\ ;$$

sau exprimând în funcţie de puterea aparentă a transformatoarelor ($S_N = \sqrt{3}\, U_2 I_N$)

$$\frac{I_I}{I} = \frac{S_{IN}}{S_{IN} + S_{IIN} + S_{IIIN}}\ ;$$

Aceasta înseamnă că transformatorul se încarcă proporţional cu puterea sa nominală.

Considerând cazul general a **n** transformatoare care funcţionează în paralel, relaţia care dă încărcarea unui transformator (transformatorul ℓ), urmând acelaşi raţionament, se prezintă sub forma:

$$\frac{I_\ell}{I} = \frac{S_{\ell N}}{\sum_{j=1}^{n} S_{jN}}$$

unde: $I = \sum_{j=1}^{n} I_{jN}$

Pentru ca transformatoarele care funcţionează în paralel, să se încarce proporţional cu puterile lor nominale, trebuie ca tensiunile de scurtcircuit (pentru sarcina nominală) ale transformatoarelor respective să fie egale.

4. Cazul în care tensiunile de scurtcircuit U_k (la sarcină nominală) nu sunt egale.

Din cele prezentate mai sus, considerând tot cazul transformatorului I, se poate scrie relaţia:

$$\frac{S_{IN}}{S_{IN}+S_{IIN}+S_{IIIN}}=\frac{\frac{1}{Z_I}}{\frac{1}{Z_I}+\frac{1}{Z_{II}}+\frac{1}{Z_{III}}}=\frac{1}{Z_I\left(\frac{1}{Z_I}+\frac{1}{Z_{II}}+\frac{1}{Z_{III}}\right)}$$

Pentru a face să apară în această relaţie tensiunile de scurtcircuit (valori relative) se foloseşte un artificiu:

$$\frac{S_{IN}}{S_{IN}+S_{IIN}+S_{IIIN}}=\frac{1}{Z_I\frac{I_{IN}}{U_2}100\frac{1}{I_{IN}}\left(\frac{I_{IN}}{\frac{I_{IN}Z_I}{U_2}100}+\frac{I_{IIN}}{\frac{I_{IIN}Z_{II}}{U_2}100}+\frac{I_{IIIN}}{\frac{I_{IIIN}Z_{III}}{U_2}100}\right)}=$$

$$=\frac{1}{\frac{U^*_{KI}}{S_{IN}}\left(\frac{S_{IN}}{U^*_{KI}}+\frac{S_{IIN}}{U^*_{KII}}+\frac{S_{IIIN}}{U^*_{KIII}}\right)}$$

Deci puterea pe care o va debita transformatorul I va fi:

$$S_I=(S_I+S_{II}+S_{III})\frac{\frac{S_{IN}}{U^*_{KI}}}{\frac{S_{IN}}{U^*_{KI}}+\frac{S_{IIN}}{U^*_{KII}}+\frac{S_{IIIN}}{U^*_{KIII}}}$$

unde U^*_{KI}, U^*_{KII}, U^*_{KIII} sunt tensiunile relative de scurtcircuit ale transformatoarelor la sarcina nominală.

Pentru cazul general a **n** transformatoare care funcţionează în paralel, puterea pe care o va debita un transformator (exemplu transformatorul ℓ) este dată de relaţia:

$$S_\ell=\sum_{j=1}^{n}S_j\frac{\frac{S_{\ell N}}{U^*_{K\ell}}}{\sum_{j=1}^{n}\frac{S_{jN}}{U^*_{Kj}}}$$

Această relaţie exprimă modul în care se repartizează puterile între transformatoarele care funcţionează în paralel, în raport cu puterea nominală a fiecăruia, când tensiunile de scurtcircuit nu sunt egale; cu cât tensiunea de scurtcircuit este mai mică, transformatoarele respective se încarcă mai mult.

4.1. Aplicaţie

Pentru alimentarea unei reţele trifazate care necesită o putere nominală de 900 KVA, se folosesc trei transformatoare având fiecare puterea nominală de 300 KVA. Transformatoarele au la sarcina nominală tensiunile de scurtcircuit 3%, 4% respectiv 5%. Să se determine repartiţia sarcinii pe cele trei transformatoare,atunci când reţeaua consumă puterea nominală.

Date: S= 900KVA; $S_I = S_{II} = S_{III}$ = 300KVA; U_{KI} = 3%; U_{KII} = 4%; U_{KIII} = 5%

$$\frac{S_I}{U_{KI}}+\frac{S_{II}}{U_{KII}}+\frac{S_{III}}{U_{KIII}}=\frac{300}{3}+\frac{300}{4}+\frac{300}{5}=235$$

Inlocuind aceste date în relaţia respectivă, rezultă:

$$S_I = 900 \frac{\frac{300}{3}}{235} = 383 \text{ KVA}; \quad S_{II} = 900 \frac{\frac{300}{4}}{235} = 288 \text{ KVA}; \quad S_{III} = 900 \frac{\frac{300}{5}}{235} = 229 \text{ KVA}$$

Se verifică ca: 383 + 288 + 229 = 900 KVA

Rezultă că primul transformator este supraîncărcat cu $\frac{383 - 300}{300} 100 = 27{,}7\ \%$

al doilea transformator este subîncărcat cu $\frac{300 - 288}{300} 100 = 4\ \%$

iar al treilea este subâncărcat cu $\frac{300 - 229}{300} 100 = 23\ \%$

Se observă că transformatorul cu tensiunea de scurtcircuit cea mai mică se încarcă cel mai mult.

Pentru ca să nu mai fie supraîncărcare, trebuie să se reducă sarcină primului transformator în raport de 300/383 = 0,78; diminuare în același raport se produce și pe celelalte transformatoare.

Rezultă încărcările: S_I = 300 KVA; S_{II} = 288 x 0,78 = 224 KVA;
S_{III} = 229 x 0,78 = 178 KVA

Sarcina debitată în rețea este de numai: 300 + 224 + 178 = 702 KVA

Verificat: **Dr.ing.T. Popa**

BIBLIOGRAFIE

Fransua, Al și colectiv — Mașini electrice uzuale, exploatarea și regimuride funcționare, Editura Tehnică București 1973.

Gheorghiu, I.S. — Mașini electrice, probleme și aplicații industriale, Editura Tehnică, București 1966

Gheorghiu, I.S. — Mașini electrice, Editura Ministerului Invățământului și Culturii, București 1958

M.E.E. — Regulament de exploatare tehnică a centralelor și rețelelor electrice, ICEMENERG – București 1987.